



HAL
open science

Plathynes : une plateforme de modélisation hydrologique développée pour les besoins de la prévision des crues

Didier Narbais-Jaureguy, Etienne Le Pape, Arthur Marchandise, Yann Laborda, Antoine Dussuchale, Pierre Horgue, Hélène Roux, Kévin Larnier, Renaud Marty, Audrey Bildstein

► To cite this version:

Didier Narbais-Jaureguy, Etienne Le Pape, Arthur Marchandise, Yann Laborda, Antoine Dussuchale, et al.. Plathynes : une plateforme de modélisation hydrologique développée pour les besoins de la prévision des crues. LHB Hydrosience Journal, 2024, 110 (1), pp.2349548. 10.1080/27678490.2024.2349548 . hal-04612040

HAL Id: hal-04612040

<https://ut3-toulouseinp.hal.science/hal-04612040v1>

Submitted on 14 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



Plathynes : une plateforme de modélisation hydrologique développée pour les besoins de la prévision des crues

Didier Narbais-Jaureguy, Etienne Le Pape, Arthur Marchandise, Yann Laborda, Antoine Dussuchale, Pierre Horgue, Hélène Roux, Kévin Larnier, Renaud Marty & Audrey Bildstein

To cite this article: Didier Narbais-Jaureguy, Etienne Le Pape, Arthur Marchandise, Yann Laborda, Antoine Dussuchale, Pierre Horgue, Hélène Roux, Kévin Larnier, Renaud Marty & Audrey Bildstein (2024) Plathynes : une plateforme de modélisation hydrologique développée pour les besoins de la prévision des crues, LHB, 110:1, 2349548, DOI: [10.1080/27678490.2024.2349548](https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2349548)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2349548>



© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 06 Jun 2024.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 35



View related articles [↗](#)



Citing articles: 1 View citing articles [↗](#)

Plathynes : une plateforme de modélisation hydrologique développée pour les besoins de la prévision des crues

Didier Narbais-Jaureguy ^a, Etienne Le Pape ^a, Arthur Marchandise ^b, Yann Laborda ^c, Antoine Dussuchale ^c, Pierre Horgue ^d, Hélène Roux ^d, Kévin Larnier ^e, Renaud Marty ^f and Audrey Bildstein ^g

^aService Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), Direction Générale de la Prévention des Risques, Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, Toulouse, France ; ^bDirection Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Occitanie (DREAL), Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, Toulouse, France ; ^cDREAL Auvergne Rhône-Alpes, Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, Nîmes, France ; ^dInstitut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Groupe de recherche Hydrologie, Eco-Hydraulique et Ondes, Toulouse, France ; ^eCS Group, Space Business Unit, Toulouse, France ; ^fDREAL Centre-Val de Loire, Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, Orléans, France ; ^gDirection Régionale et Interdépartementale de l'Environnement de l'Aménagement et des Transports Île-de-France, Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, Paris, France

RÉSUMÉ

En France, le Ministère de la Transition Écologique avec Vigicrues fournit une information sur le risque de crues à venir dans les prochaines 24 h (Vigilance Crue) sur plus de 20000 km de cours d'eau. En complément de cette information, des prévisions de débits ou de hauteurs d'eau sont produites sur plus de 500 stations hydrométriques. Pour les besoins de la prévision des crues, PLATHYNES, une plateforme multi-modèles a été développée. L'article permettra de revenir sur l'origine de ce projet et détaillera ses trois principaux modèles distribués. Ils permettent sur le pourtour méditerranéen français mais aussi dans d'autres contextes hydroclimatiques de fournir des prévisions de crues lors d'épisodes pluvieux très intenses.

Le mode global – semi-distribué de PLATHYNES sera également présenté, il permet notamment de créer des modèles simples de propagation débit-débit.

Enfin dans le cadre de son plan stratégique, le réseau Vigicrues ambitionne de fournir sur les stations présentant les enjeux les plus importants, des prévisions plus fiables et avec une échéance d'au moins 24 h. En outre, une information de vigilance crues devra être publiée à terme, sur l'ensemble des cours d'eau de métropole. Pour atteindre ces objectifs ambitieux l'outil PLATHYNES de par sa polyvalence constitue un atout important.

MOTS-CLÉS

modélisation hydrologique ;
prévision des crues ; temps
réel

KEYWORDS

flood warning; hydrological
modelling; real time forecast

Plathynes: a specific modelling platform for flood forecasting

ABSTRACT

In France, the Ministry for Ecological Transition with Vigicrues provide information on the risk of flooding over the next 24 hours (Vigilance Crue) for more than 20000 km of rivers. In addition to this information, flow and water level forecasts are produced at more than 500 hydrometric stations. PLATHYNES, a multi-model platform, has been developed for flood forecasting purposes. This article will review the origins of this project and details its three main distributed models. These models are used in the French Mediterranean region and in other hydroclimatic contexts to provide flood forecasts for very intense rainfall events.

The global semi-distributed mode of PLATHYNES will also be presented, enabling simple flow discharge propagation models to be created.

Finally, as part of its strategic plan, the Vigicrues network aims to provide more reliable forecasts with a lead time of at least 24 hours for the stations where the greatest stakes are involved. In addition, flood warning information should eventually be published for all rivers in mainland France. To achieve these ambitious objectives, the PLATHYNES tool's versatility is a major asset.

1. La genèse et les objectifs du projet PLATHYNES

1.1. La genèse du projet PLATHYNES

Afin de pouvoir davantage anticiper les risques de crues sur les cours d'eau méditerranéens le réseau

Vigicrues et notamment les Services de Prévision des Crues (SPC) du sud-est de la France se sont intéressés dans les années 2000 à la modélisation pluie-débit distribuée. Son intérêt est de pouvoir prendre en compte la variabilité spatiale des paramètres et facteurs qui conditionnent la réponse hydrologique des

CONTACT Didier Narbais-Jaureguy  didier.narbais-jaureguy@developpement-durable.gouv.fr

© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

bassins, notamment la variabilité spatiale inhérente aux précipitations méditerranéennes.

Cette variabilité spatiale des précipitations est en effet de mieux en mieux appréhendée, en observation par les produits de précipitations issus des réseaux de radars météorologiques (ANTILOPE, SERVVAL, ...) (Tabary et al., 2013), en prévision par les sorties des modèles numériques de prévisions du temps non hydrostatiques à mailles fines (modèle AROME de METEO FRANCE en particulier ; Seity et al., 2011).

Dans le cadre de l'expérimentation Bassin Versant Numérique Expérimental (BVNE), les modèles distribués ALHTAÏR (Bressand, 2002), MARINE (Douinot et al., 2018 ; Garambois et al., 2015 ; Roux et al., 2020, 2011) SCS/Lag and Route (Marchandise, 2007) ont été expérimentés avec l'appui de partenaires scientifiques comme l'Ecole des Mines d'Alès, l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse, le laboratoire Hydrosociétés Montpellier et le Service de Prévision des Crues Grand Delta. L'idée générale était de construire une base de comparaison commune à ces modèles.

Les défis à surmonter étaient nombreux: mise en œuvre et calage de ces différentes approches sur des bassins aux caractéristiques très différentes, adaptation du code de calcul pour fonctionner en analyse et prévision, intégration de ces nouveaux outils dans une chaîne opérationnelle qui permette d'intégrer des données spatialisées avec un pas de temps infra-horaire et avec des temps de calculs qui soient compatibles avec les contraintes de la production de prévisions en crues.

Le besoin d'un environnement de travail unifié qui permette d'accueillir ces modèles distribués est apparu, afin d'être en mesure de:

- Générer la structure topologique des modèles (grilles à mailles carrées régulières et directions d'écoulements) à partir d'un Modèle Numérique de Terrain;
- préparer et traiter facilement les données hydro-météorologiques, notamment les matrices de pluie radar;
- calibrer les paramètres des modèles;
- comparer les résultats des sorties des modèles;
- jouer les modèles en temps réel dans un environnement compatible avec le système temps réel mis en place par le SCHAPI;

Le prototypage de la nouvelle PLATeforme HYdrologique pour la modélisation des Ecoulements Superficiels (PLATHYNES) s'est inspiré conceptuellement de la plateforme ATHYS (Bouvier & Delclaux, 1996), notamment sur l'aspect modulaire, tout en simplifiant certains modules – le module de traitement des modèles numériques de terrain en particulier- et en reprenant par ailleurs certains modèles (ALHTAÏR et SCS/LR).

1.2. Les objectifs opérationnels

Avec le développement de PLATHYNES le SCHAPI vise plusieurs objectifs techniques, opérationnels et organisationnels.

L'objectif principal est de fournir à travers les différentes approches de modélisation une solution pour la prévision du franchissement de seuils de débits dans les 24 h et pour la publication de prévisions de crues composées de trois tendances (basse, moyenne, haute) représentatives des incertitudes dont celles de la modélisation (Berthet et al., 2016). Ces différentes informations prévisionnelles (vigilance et prévisions graphiques avec incertitudes) sont diffusées lors des épisodes de crues sur le site Vigicrues (Figure 1).

Le calage des modèles sur les différents bassins est réalisé le plus souvent par les équipes de modélisateurs des SPC. Il est apparu par conséquent nécessaire de développer une interface pour faciliter les interactions avec le noyau de calcul PLATHYNES (voir 2.2).

Afin de produire cette prévision en temps réel, le modèle doit pouvoir être alimenté par des flux de données (précipitations observées, prévues, humidité des sols...), les temps de calcul doivent également être faibles (quelques minutes au maximum). En outre, les modèles PLATHYNES doivent pouvoir être enchaînés à l'aval avec d'autres modèles de propagation.

Toutes ces contraintes ont conduit à la mise en place progressive d'une chaîne opérationnelle pour la production de la vigilance et des prévisions qui sera décrite par la suite en 2.3.

2. L'outil PLATHYNES et son fonctionnement opérationnel

2.1. Le noyau de calcul

Le noyau de calcul PLATHYNES a été développé sur la base du noyau MARINE en langage FORTRAN. Il contient à la fois le code de calcul des modèles et certains pré- et post-traitements. Deux modes distincts sont disponibles: le premier mode permet de configurer des modèles distribués, les calculs sont faits sur chacune des mailles carrées d'un domaine qui couvre le bassin versant. Le deuxième mode permet de configurer des modèles globaux ou semi-distribués. Dans ce cas, les entités de calcul sont des objets (biefs et sous-bassins essentiellement) associés à des lois de production ou de transfert qui sont reliées par le modélisateur pour constituer un schéma conceptuel de fonctionnement du bassin versant (Figure 5).

Les modèles PLATHYNES sont des modèles événementiels qui se limitent à la simulation des seuls épisodes de crues. L'évapotranspiration étant négligeable à cette échelle de temps, elle ne constitue pas un forçage des différentes lois de production PLATHYNES. Une initialisation est alors

Neufchâteau [crues] (Meuse) - Débits - 06/05/2024 17:02

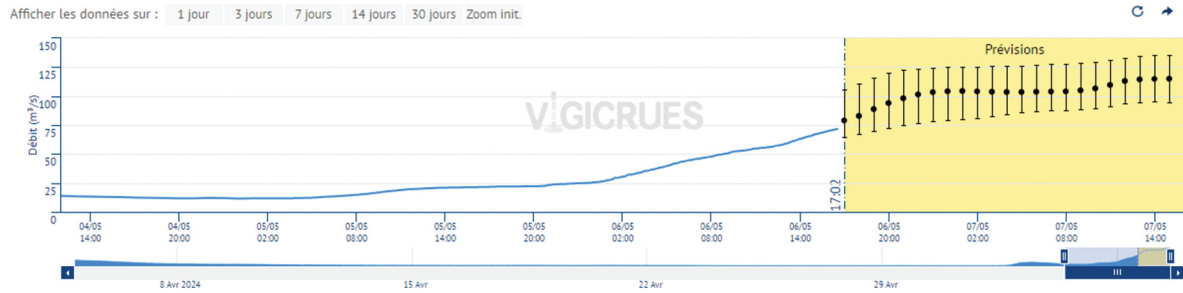


Figure 1. Graphique de prévision publié sur Vigicrues.

nécessaire pour définir les variables d'état du bassin avant l'épisode de pluie générateur de la crue, c'est généralement l'humidité initiale du bassin issue du modèle SAFRAN-ISBA-MODCOU (Habets et al., 2008) qui est utilisée. Dans certains contextes, il est apparu avantageux de remplacer l'humidité des sols par le débit de base du cours d'eau ou la hauteur d'eau d'un ou plusieurs piézomètres, pour déterminer le déficit en eau initial du réservoir de la loi de production SCS (Bildstein, 2018 et Hakoun & Charlier, 2022).

Pour le mode distribué, les différentes lois de production et de transfert présentent un certain nombre de paramètres dont les valeurs peuvent être différentes ou identiques sur chacune des mailles. Dans l'approche MARINE les paramètres comme l'épaisseur de sol ou la conductivité hydraulique sont entrés par points de grille et lors de la calibration, un coefficient multiplicateur unique pour l'ensemble de la grille sera calé. En ce qui concerne ALHTAIR et SCS/LR, les paramètres sont par défaut uniformes pour toutes les mailles du modèle, toutefois certaines zones (sous-bassins versants ou zones personnalisées) peuvent être définies par le modélisateur pour la prise en compte de comportements spécifiques sur certaines parties du bassin versant. Il est ainsi possible de distinguer par exemple les mailles des versants, des mailles du réseau de drainage. L'intérêt de ce paramétrage par zone a été mis en évidence sur le bassin de la Sorgues (cf 4.1).

La calibration automatique permet d'optimiser les paramètres de chaque loi lorsque des observations de débits sont disponibles en minimisant une fonction coût du type Nash and Sutcliffe ou erreur quadratique moyenne. Pour les besoins de la prévision des crues, la fonction coût L_{NP} introduite par Roux et al. (2011) peut être avantageuse car elle est basée sur trois composantes: le Nash, l'estimation de la date et de la valeur du maximum du débit de crue.

2.2. L'interface de construction et calage des modèles

Dès les débuts du projet le choix a été fait de développer une interface graphique pour piloter le noyau de calcul (Figure 2), afin de faciliter la prise en main de l'outil par les modélisateurs des SPC. L'interface PLATHYNES présente trois onglets : (i) le premier pour configurer le modèle (choix des lois de production, de transferts, définition d'un ou plusieurs points de sortie, définition des types de paramètres ...), (ii) Le deuxième onglet permet de charger les différents événements (forçages, débits observés, humidité des sols) qui serviront au calage ou à la validation, (iii) enfin le dernier onglet permet de lancer des simulations ou des calages et de visualiser les hydrogrammes produits avec le calcul automatique d'indicateurs pour évaluer la pertinence des simulations par rapport aux observations.

2.3. L'intégration des modèles PLATHYNES dans la chaîne opérationnelle Vigicrues

Les contraintes de la production de prévisions régulièrement mises à jour en cours d'épisode et l'alimentation des modèles avec différents produits de prévisions de pluies ont conduit le SCHAPI à construire une chaîne opérationnelle de production (Figure 3).

Dans ce système les différents modèles nationaux Telemac, Mascaret (modèles hydrodynamiques) et GRP, PLATHYNES (modèles hydrologiques pluie-débit) sont pilotés par la POM (Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation) qui va gérer l'alimentation des modèles, leur lancement, les éventuels enchaînements et la récupération des prévisions. Les bases de données BD Image pour les données météorologiques (observées et prévues) et PHYC pour les données hydrométriques (observées et prévues) mettent à disposition des webservices pour faciliter les échanges avec la POM. Le superviseur permet ensuite au

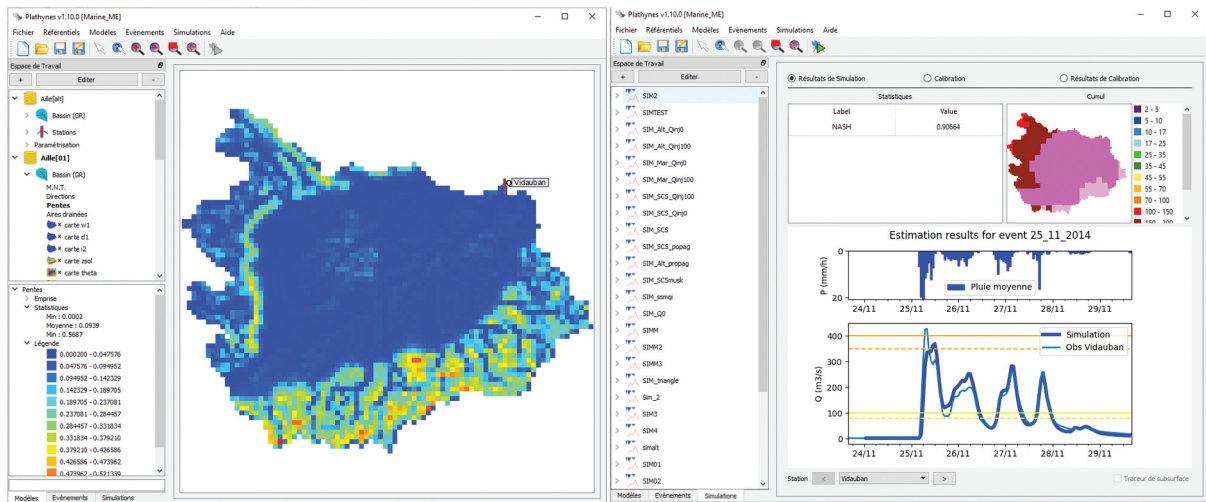


Figure 2. Interface graphique de PLATHYNES, carte des pentes et visualisation des simulations.

prévisionniste de visualiser les différentes entrées et sorties (météorologiques et hydrologiques). Chaque prévision brute est enfin expertisée par un prévisionniste avant d’être publiée sur Vigicrues.

Pour répondre aux contraintes des calculs temps réel, le pilotage de PLATHYNES par la POM intègre le déclenchement automatique de l’initialisation du modèle dès que les pluies observées dépassent un certain cumul sur une durée donnée. En outre il intègre la possibilité de lancer des calculs d’analyse sur la base des observations de pluies et de prévision à partir des prévisions de pluies (plusieurs scénarios possibles). A la fin de chaque analyse, un fichier relai de sauvegarde de l’ensemble des états du modèle est conservé. Il est ensuite repris par les

calculs de prévision ou le prochain calcul d’analyse, ce type de fonctionnement permet d’éviter le chargement à chaque lancement de l’ensemble des données de pluies observées depuis la date de l’initialisation.

3. Les différentes approches de modélisation

Développés dans un premier temps pour fournir une solution aux SPC méditerranéens, les modèles distribués ont finalement été testés et validés sur des bassins situés dans des contextes hydro-climatiques très différents. Ainsi, sur des bassins du centre et du nord du pays aux dynamiques plus lentes. Les SPC ont trouvé une solution de modélisation complémentaire aux

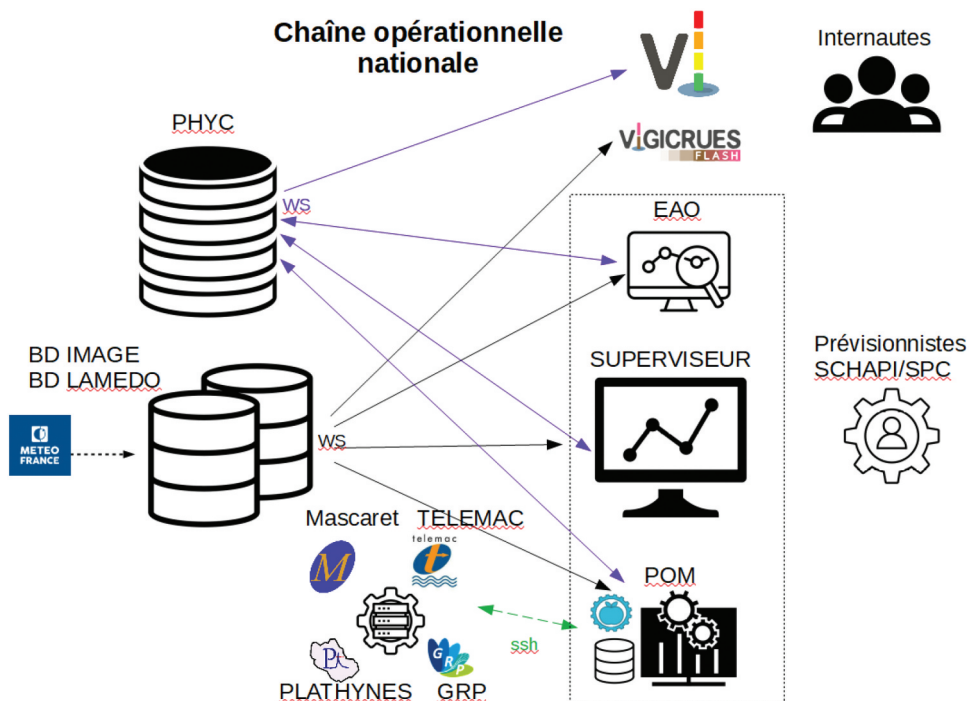


Figure 3. Chaîne opérationnelle Vigicrues.

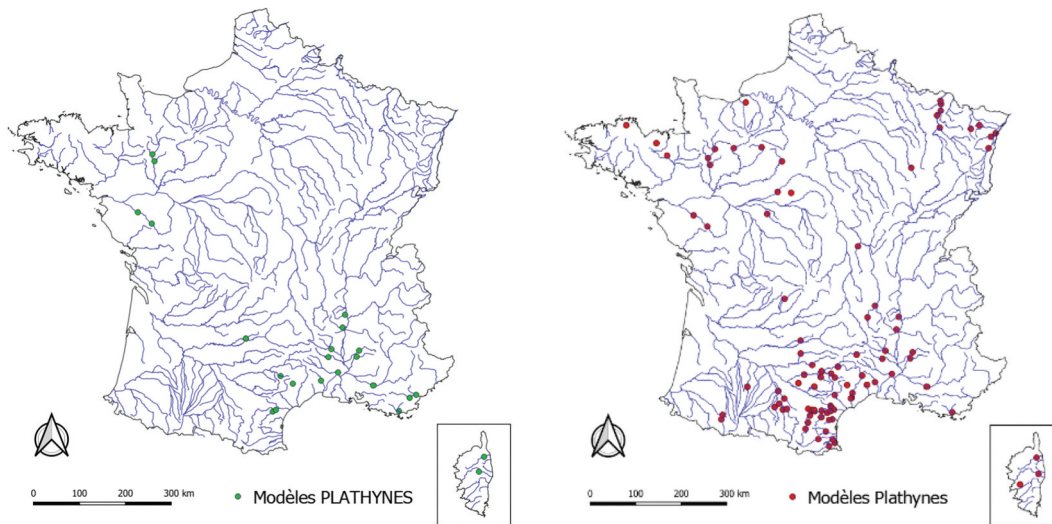


Figure 4. Modèles PLATHYNES recensés en 2019 et 2022.

approches continues et globales largement utilisés sur ces cours d'eau (Figure 4).

La possibilité d'exploiter les débits observés en amont dans un modèle distribué sur le bassin intermédiaire ainsi que les possibilités de personnalisation du calage et de la configuration des modèles font partie des atouts avancés par les services pour justifier l'utilisation de PLATHYNES.

Enfin, dans le cadre de la stratégie de modélisation du SCHAPI, il est préconisé de développer les approches distribuées en dehors du contexte méditerranéen pour faire face à la recrudescence des épisodes pluvieux intenses comme celui de juillet 2021 qui a touché l'Allemagne, la Belgique et le nord-est de la France

3.1. Les modèles distribués

3.1.1. MARINE

Le modèle MARINE (Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des événements Extrêmes; Roux et al., 2011) est un modèle à base physique développé spécifiquement pour la prévision des crues éclaircies sur le pourtour méditerranéen. La structure du modèle permet de simuler l'infiltration, les écoulements de subsurface et les écoulements de surface sur les versants et le réseau de drainage. L'infiltration considérée comme verticale sur une colonne homogène de sol est régie par l'équation de Green et Ampt : elle permet de dissocier la part de la pluie qui va ruisseler en surface de la part qui va s'infiltrer. Les écoulements de subsurface représentent les écoulements à travers la couche superficielle des sols en zone non saturée, ils sont simulés sur la base de la loi de Richards. Enfin les écoulements de surface sur les versants et le réseau de drainage sont calculés à l'aide de l'approximation de l'onde cinématique, en tenant compte d'une géométrie simplifiée sur les

cours d'eau établie à partir de relations géomorphologiques (Liu & Todini, 2002).

3.1.2. SCS – Lag & Route

La loi de production SCS a été mise au point aux Etats-Unis pour simuler de manière conceptuelle un ruissellement à l'échelle de parcelles. Elle a été adaptée (Marchandise, 2007) pour pouvoir simuler des crues rapides dans un contexte méditerranéen. La principale modification a consisté à introduire un terme de vidange pour mieux simuler le ressuyage des sols et les décrues par une reprise partielle de cette vidange. Le transfert par Lag & Route s'apparente à un transfert par hydrogramme unitaire largement utilisé en hydrologie. Le temps de transfert est calculé à partir d'un paramètre assimilé à une vitesse de transfert et de la distance de la maille par rapport à l'exutoire.

3.1.3. ALHTAIR

Développé au sein du Service d'Annonce des Crues du Gard (actuel SPC Grand Delta) au début des années 2000, le modèle ALHTAIR¹ (Bressand, 2002) permet, en se basant sur le principe du réservoir d'Horton, une restitution fidèle des hydrogrammes observés sur les bassins à réactions rapides impactés par des précipitations intenses. Constituant l'unité de base de la chaîne de modélisation du SPC Grand Delta depuis plus de 20 ans, il est utilisé principalement sur des bassins versants de petites tailles (< 500 km²) soit pour produire une prévision directe à une station hydrométrique, soit pour modéliser un hydrogramme sur un bassin

¹Alerte Hydrologique Territorialisée Avec Indicateur de Risque http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/La_pr%C3%A9vision_des_crues_%C3%A0_l%27aide_du_mod%C3%A8le_pluie/d%C3%A9bit_spatialis%C3%A9_ALHTAIR_sur_les_bassins_c%C3%A9venols

versant non jaugé afin d'alimenter un modèle de propagation.

En plus de sa loi de production, il est constitué d'une loi de transfert calée sur les caractéristiques des bassins versants cévenols gardois qui présentent des pentes relativement marquées et continues. Son implémentation dans PLATHYNES permet à la fois d'initialiser la capacité d'infiltration initiale du réservoir sol en fonction de l'humidité de la chaîne SIM mais aussi de le coupler à d'autres lois de transfert (onde cinématique, Lag and Route) ce qui offre la possibilité d'utiliser ALHTAIR sur des bassins présentant des caractéristiques topographiques différentes de ceux pour lesquels il a été pensé.

3.2. Les modèles de propagation débit-débit

Le mode global et semi-distribué de PLATHYNES permet de créer de manière graphique un modèle de prévision composé de sous-modèles pluie-débit éventuellement combinés et enchaînés avec des modèles de propagation débit-débit représentés respectivement par des objets "bassins" et "biefs" (Figure 5).

Cette approche a été enrichie ces dernières années par deux nouveaux modèles de propagation débit-débit appelés PREVI et MOHYS qui peuvent être utilisés seuls pour propager un ou plusieurs débits amont observés ou combinés avec des modèles pluie-débit pour représenter en particulier des apports intermédiaires.

3.2.1. PREVI

Le modèle PREVI (Figure 6) est un modèle de propagation conceptuel développé par le SPC Grand Delta pour modéliser simplement la propagation des débits le long du cours d'eau principal tout en intégrant la production des différents affluents ou bassins versants intermédiaires (voir Figure 4). Le principe du modèle réside dans la création d'un retard de l'écoulement des débits supérieurs à un débit de débordement fixé par le modélisateur. En pratique, le cours d'eau est divisé en casiers de propagation dans lesquels des lois simples permettent de simuler les échanges de débordement/restitution entre le lit mineur et la zone inondable en fonction des débits entrants/stockés/sortant. Ainsi, il est possible de simuler des retards dans l'écoulement ou des écrêtements généralement observés lors des crues débordantes dans des zones de faible expansion de crues. L'efficacité du modèle repose notamment sur l'assimilation de l'hydrogramme modélisé par rapport à celui observé jusqu'à l'instant de prévision en modulant quatre paramètres. Deux de ces paramètres concernent l'incertitude des données de forçage ($\pm 20\%$ pour les débits observés, $\pm 50\%$ pour les débits modélisés des affluents contributeurs non jaugés), un autre paramètre concerne le retardement plus ou moins important des débits débordants

et enfin un dernier permet de prendre en compte un débit de base afin que la prévision corresponde au débit observé à la station de prévision en début d'épisode. Son intégration dans PLATHYNES, permet au SPC Grand Delta de piloter la grande majorité de ses modèles de prévisions avec la POM et PLATHYNES.

3.2.2. MOHYS

L'approche MOHYS est une adaptation d'une modélisation de la propagation d'onde de crue de type Lag and Route (LR) développée par le SPC Loire-Allier-Cher-Indre. La méthode LR est uniquement capable de représenter la translation de l'onde de crue par décalage temporel fixe mais n'intègre pas de modélisation de processus d'atténuation. Le temps de propagation peut dépendre de la profondeur de l'écoulement, de l'activation du lit majeur, de la géométrie du réseau hydrographique. Par ailleurs, les sites hydrologiques des affluents du cours d'eau principal sont rarement situés au droit des confluences. Il est donc nécessaire de prendre en compte le bassin intermédiaire situé entre le site et la confluence. Sans oublier qu'un affluent peut représenter les apports d'autres cours d'eau non jaugés. MOHYS complète le formalisme de LR en autorisant un temps de propagation variable (initialement estimé par l'écart temporel entre les pointes amont et aval), selon une information disponible en temps réel (exemple : pointe de crue observée ou prévue à une station hydrométrique amont, débit maximal sur les heures précédentes . . .), un coefficient multiplicatif variable afin de tenir compte d'éventuels effets de laminage (initialement estimé par le rapport des pointes de crue amont/aval), d'apports sur les affluents jaugés et/ou les affluents voisins (initialement estimé par le rapport des surfaces jaugées et contributives). MOHYS intègre également un hydrogramme unitaire associé à chaque station hydrométrique amont. Cela permet de lisser les ondes de crues propagées, ce qui s'avère indispensable en aval des grands ouvrages hydrauliques où les changements rapides de consigne d'évacuation de crue sont lissés temporellement par l'environnement naturel du cours d'eau. Cette fonctionnalité peut être annulée lorsque le modélisateur définit une fonction Dirac. MOHYS offre donc un formalisme qui s'adapte à un grand nombre de situations connues lorsque le modélisateur cherche à représenter la propagation des ondes de crues d'amont en aval, en intégrant aussi les affluents. Les différentes options sont illustrées à la Figure 7 qui présente les simulations de l'événement novembre 2016 sur la Loire à Digoin : au formalisme Lag and Route sont successivement ajoutés le temps de propagation variable, les coefficients d'apport et les hydrogrammes unitaires.

Historiquement, la définition de l'hydrogramme unitaire optimal de MOHYS était réalisée

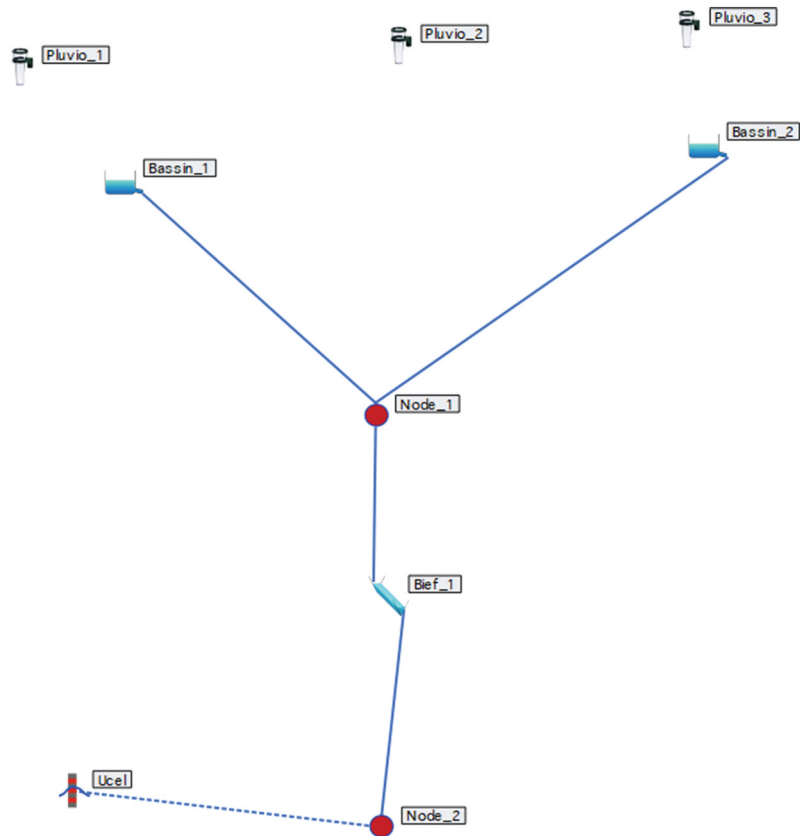


Figure 5. Exemple de modèle semi-distribué PLATHYNES.

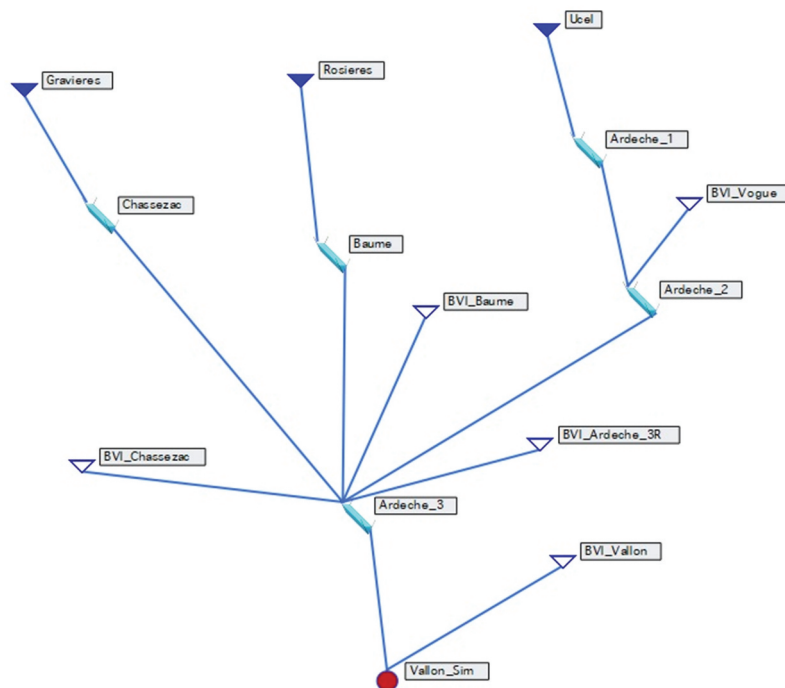


Figure 6. Modélisation PREVI – Bassin versant de l'Ardèche (les triangles bleu pleins correspondent à des débits observés, les vides à des débits modélisés).

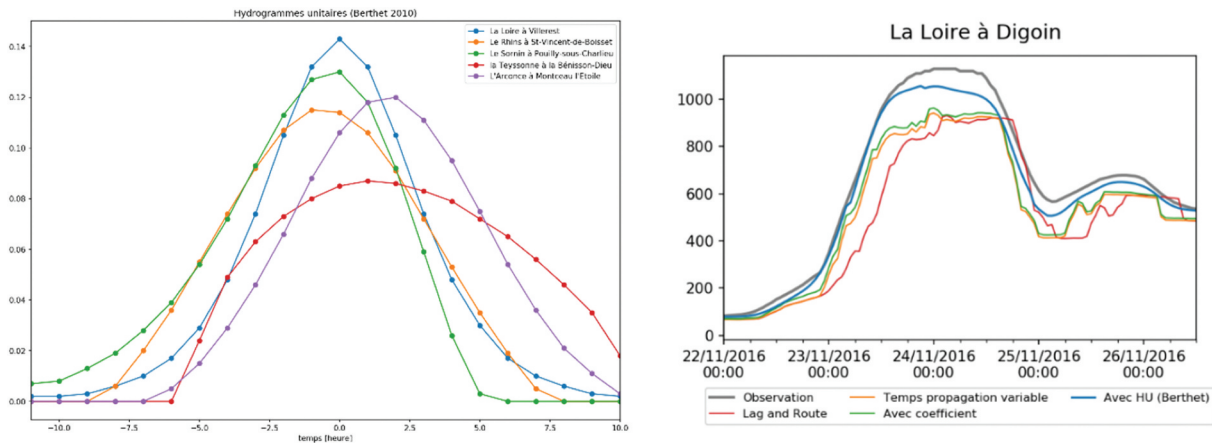


Figure 7. Modélisation selon le formalisme MOHYS. A gauche : les hydrogrammes unitaires. A droite : les simulations de l'événement de novembre 2016 obtenues en ajoutant successivement le temps de propagation variable, les coefficients d'apport et les hydrogramme.

manuellement, par itération. L'intégration du formalisme MOHYS dans PLATHYNES est l'occasion de réduire le nombre de paramètres en utilisant des formules paramétriques pour caractériser cet hydrogramme unitaire. Une vingtaine de formes ont été évaluées, que ce soient des formes géométriques simples (triangle, rectangle), des fonctions mathématiques discrètes ou des fonctions déjà proposées dans la littérature (voir notamment Berthet, 2010 ; Le Moine, 2008). La recherche des meilleures formulations paramétriques repose sur l'analyse de 133 hydrogrammes unitaires extraits de la modélisation du SPC LACI. Elle met en évidence que la fonction de Berthet (2010) est la plus ressemblante. Les formes géométriques simples sont également pertinentes pour PLATHYNES. La dernière formulation retenue (puissance) est symétrique et permet d'avoir des décroissances non linéaires autour du point central de l'hydrogramme unitaire.

4. Des configurations adaptables aux besoins de la prévision opérationnelle

4.1. La Sorgues à Saint-Felix-de-Sorgues

Le bassin de la Sorgues a connu une crue dévastatrice en novembre 2014. La commune de Saint-Affrique a notamment payé le plus lourd tribut, avec 20 % de la ville sinistrée. Suite à cette crue, le Service de Prévision des Crues Garonne Tarn Lot, en charge de la vigilance de la prévision des crues sur le tronçon Dourdou-Sorgues-Rance, a travaillé à mettre en place une modélisation pluie-débit qui, associée à des prévisions de précipitations, doit permettre de mieux anticiper la montée des eaux sur la Sorgues. Le premier travail a été réalisé sur la station de Saint-Félix-de-Sorgues, située en amont de Saint-Affrique.

Deux défis étaient à relever : prendre en compte une variabilité importante des précipitations et appréhender la réponse hydrologique spécifique

d'un système karstique, le Causse du Larzac-, situé sur la partie nord et est du bassin. Le système karstique est suspecté d'atténuer fortement la réponse hydrologique aux précipitations intenses en termes de débit de pointe : des études réalisées en retour d'expérience de l'épisode du 12 septembre 2015 sur le bassin voisin de la Lergue – qui partage le Causse du Larzac –, ont montré des débits de pointe trois fois inférieurs sur la partie karstique du bassin à ceux de la partie socle, pour une taille de bassin identique (Brunet & Bouvier, 2017).

La plateforme PLATHYNES a été utilisée pour prendre en compte une différenciation des paramètres de la loi de production du modèle SCS entre la zone de socle et la zone karstique. Les résultats du calage aboutissent à faire jouer au système karstique un rôle secondaire sur la réponse rapide du modèle à des précipitations intenses (valeurs du paramètre $S > 600$ mm du modèle SCS), tout en lui faisant jouer un rôle prépondérant sur la dynamique de décrue (Figure 8a).

La performance du modèle évaluée sur une dizaine d'épisodes de crue entre 2012 et 2023 est sensiblement améliorée. Sur l'épisode exceptionnel du 28/11/2014, la représentation permet notamment de réduire sensiblement la surestimation du modèle qui était constatée sur la configuration initiale du modèle sans différenciation du comportement du karst. (Voir Figure 8b).

4.2. Utilisation de l'injection de débits sur la Loire amont

PLATHYNES offre la possibilité de modéliser un bassin versant intermédiaire en autorisant l'injection de débits en une ou plusieurs mailles (Figure 9). Cette fonctionnalité est pertinente lorsque le modélisateur souhaite ignorer une partie amont du bassin versant,



Figure 8a. Comparaison entre les débits observés à Saint-Félix de Sorgues (en abscisse) et les débits simulés dans la configuration "socle" (triangles inversés en ordonnée) et "karst" (carrés en ordonnée).

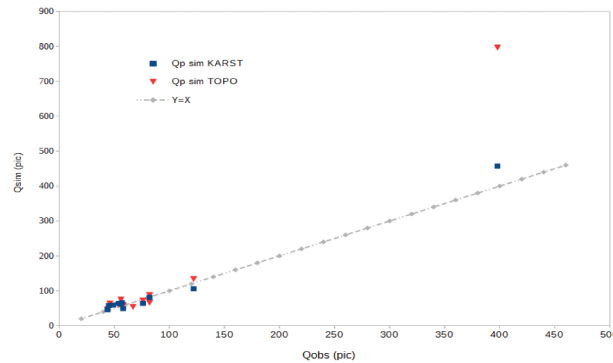


Figure 8b Bassin hydrogéologique de la Sorgues : différenciation des valeurs des paramètres du modèle sur la partie socle (en noir) de la partie karstique (en noir, source BD LISAH).

soit parce qu'elle ne peut être modélisée par PLATHYNES (ex : présence d'ouvrages hydrauliques), soit parce qu'elle est modélisée de façon satisfaisante par un modèle plus simple ou encore pour tenir compte d'une expertise du prévisionniste en temps-réel que l'on souhaite alors propager. Parmi les cinq modèles SCS-LR PLATHYNES implémentés dans le système de prévision du SPC Loire-Allier-Cher-Indre, quatre se

caractérisent par une ou plusieurs injections de débits (la Loire de Pont-de-la-Borie à Chadrac, la Loire de Chadrac à Bas-en-Basset, la Besbre de Saint-Prix à Saint-Pourçain-sur-Besbre et l'Indre d'Ardentes à Perrusson).

Dans la pratique, les volumes injectés dans PLATHYNES sont traités comme des volumes de pluie brute au niveau de la maille d'injection. L'ensemble

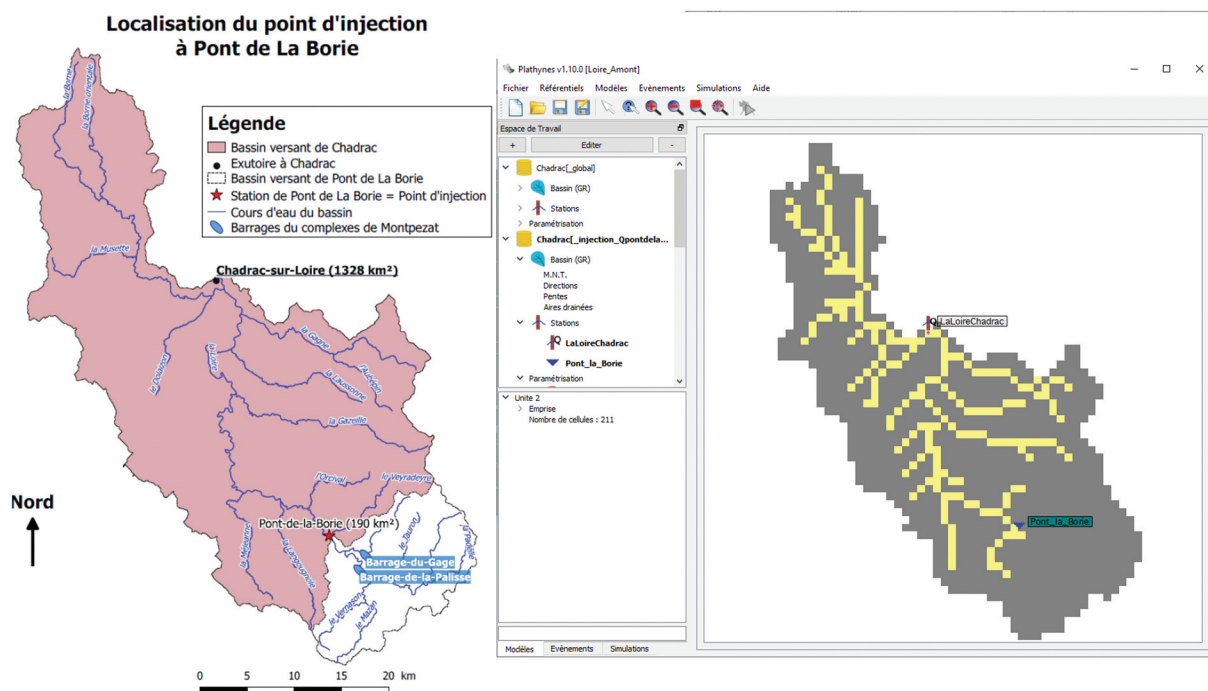


Figure 9. Modélisation de la Loire à Chadrac, (gauche) carte de l'injection de débit à Pont de la Borie (source : Bildstein (2018)), (droite) représentation simplifiée des unités de surface PLATHYNES.

des mailles en amont de l'injection est masqué: la pluie tombée en amont n'est alors pas prise en compte. La quantité d'eau injectée est soumise à la fonction de production puisqu'elle est considérée comme de la pluie précipitée, avant d'être transférée à l'exutoire. Cela peut alors nécessiter de différencier les mailles des versants et les mailles du réseau hydrographique afin de propager correctement cette injection. Bildstein (2018) met en évidence que l'absence de cette distinction dégrade les simulations de débit de la Loire à Chadrac en raison d'une atténuation trop forte de l'onde propagée par un coefficient de diffusion unique à l'échelle du bassin versant. La création de deux unités de surface améliore les critères de performance (Nash) et aussi la simulation des pointes de crues (en temps et en amplitude).

5. Conclusion et perspectives

Depuis le premier prototype jusqu'à aujourd'hui, la plateforme de modélisation PLATHYNES a été fiabilisée, s'est enrichie de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux modèles. L'intégration du noyau de calcul dans une chaîne opérationnelle complète permet d'exploiter en situation de crise l'ensemble des possibilités offertes par PLATHYNES. La modélisation distribuée s'est largement développée au sein des SPC méditerranéens mais également au sein d'autres services dont les bassins peuvent eux aussi connaître des épisodes de crues générés par des pluies convectives. La souplesse de l'outil PLATHYNES qui permet de configurer différentes approches de modélisations et options de calculs offre aux SPC la possibilité de disposer de simulations sur une grande variété de bassins versants afin de produire une information de vigilance et des prévisions quantitatives de débits publiées sur Vigicrues.

Ces dernières années les approches de propagation débit-débit se sont enrichies de nouveaux modèles tels que MOHYS et PREVI. Il sera également complété dans l'année 2023 par un nouveau module barrage qui permettra de simuler l'évolution de la hauteur d'eau dans une retenue et le débit sortant en fonction des caractéristiques physiques d'un barrage et de ses règles de gestion.

Enfin dans le cadre du plan stratégique du réseau Vigicrues, le dispositif de vigilance crues évolue. Sur les stations à enjeux les prévisions devront répondre à un cadre technique plus exigeant (prise en compte des prévisions de pluies et incertitudes associées, publication des hydrogrammes durant la crue et la décrue...). D'autre part, le réseau Vigicrues ambitionne d'étendre la vigilance crues à tous les cours du territoire métropolitain. Pour relever ce double défi nul doute que l'outil PLATHYNES de par sa polyvalence fera partie des solutions techniques qui pourront

être mises en œuvre. Pour cela le réseau Vigicrues devra approfondir certains sujets transverses comme la prise en compte des prévisions météorologiques d'ensembles, l'estimation des incertitudes liées à la modélisation, la propagation des incertitudes dans les enchaînements de modèles, la calibration automatique sur un grand nombre de bassins et l'assimilation de données de différentes natures dans la modélisation hydrologique.

Déclaration de divulgation

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

ORCID

Didier Narbais-Jaureguy  <http://orcid.org/0009-0002-0151-3791>

Etienne Le Pape  <http://orcid.org/0000-0001-8832-5392>

Pierre Horgue  <http://orcid.org/0000-0002-2358-8113>

Hélène Roux  <http://orcid.org/0000-0001-7076-5015>

Kévin Larnier  <http://orcid.org/0000-0002-4350-6285>

Renaud Marty  <http://orcid.org/0000-0003-3070-8643>

Audrey Bildstein  <http://orcid.org/0000-0002-2150-9311>

Références

- Berthet, L. (2010). *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*. [Thèse de Doctorat]. Cemagref (Antony), AgroParisTech. <https://theses.hal.science/tel-02594604v1>
- Berthet, L., Gaume, E., & Piotte, O. (2016). Evaluer et communiquer les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques pour mieux partager l'information. *La Houille Blanche*, 102(4), 18–24. les groupes de travail du Conseil scientifique et technique du SCHAPI and du chantier d'intérêt commun SCHAPI – SPC Estimation des incertitudes de prévision. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016035>
- Bildstein, A. (2018). *Modélisation hydrologique distribuée pour la prévision des crues de la Loire à Chadrac. Mastère spécialisé en Hydraulique*. INP Toulouse.
- Bouvier, C., & Delclaux, F. (1996). *ATHYS: A hydrological environment for spatial modelling and complig with a GIS*. Proceedings of the HydroGIS 96, Vienna, Austria, pp. 19–28. AIHS publication no 235
- Bressand, F. (2002). Le projet ALHTAÏR du service d'annonce des crues du Gard. *La Houille Blanche*, 88(2), 64–68. <https://doi.org/10.1051/lhb/2002024>
- Brunet, P., & Bouvier, C. (2017). retour d'expérience sur la crue du 12 septembre 2015 à Lodève (Hérault, France) : Influence du karst sur les débits de pointe de crue. *La Houille Blanche – Revue Internationale de L'eau*, 103(3), 39–46. <https://doi.org/10.1051/lhb/2017020>
- Douinot, A., Roux, H., Garambois, P.-A., & Dartus, D. (2018). Using a multi-hypothesis framework to improve the understanding of flow dynamics during flash floods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5317–5340. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5317-2018>
- Garambois, P. A., Roux, H., Larnier, K., Labat, D., & Dartus, D. (2015). Characterization of catchment

- behaviour and rainfall selection for flash flood hydrological model calibration: Catchments of the eastern Pyrenees. *Hydrological Sciences Journal*, 60(3), 424–447. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.909596>
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., & Viennot, P. (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6), D06113. <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>
- Hakoun, V., & Charlier, J.-B. (2022, January 17) *Evaluation de l'apport de l'information hydrogéologique sur les performances de modélisation des bassins karstiques*. Rapport final V1.
- Le Moine, N. (2008). *Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?* [Thèse de Doctorat]. Université Pierre et Marie Curie (Paris), Cemagref (Antony).
- Liu, Z., & Todini, E. (2002). Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(5), 859–881. <https://doi.org/10.5194/hess-6-859-2002>
- Marchandise, A. (2007). *Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques*. [Thèse inédite]. Université Montpellier II sciences et techniques du Languedoc.
- Roux, H., Amengual, A., Romero, R., Bladé, E., & Sanz-Ramos, M. (2020). Evaluation of two hydrometeorological ensemble strategies for flash-flood forecasting over a catchment of the eastern pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 4525–450. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-425-2020>
- Roux, H., Labat, D., Garambois, P.-A., Maubourguet, -M.-M., Chorda, J., & Dartus, D. (2011). A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2567–2582. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2567-2011>
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., & Masson, V. (2011). The AROME-France convective scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976–999. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>
- Tabary, P., Augros, C., Champeaux, J. L., Chèze, J. L., Faure, D., Idziorek, D., Lorandel, R., Urban, B., & Vogt, V. (2013). Le réseau et les produits radars de Météo-France. *La Météorologie*, 8(83), 15. <https://doi.org/10.4267/2042/52050>